

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CASSINO E DEL LAZIO  
MERIDIONALE



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA  
TRABAJO FIN DE GRADO (PROGRAMA ERASMUS)

# **ESTUDIO CINEMÁTICO DE UN PANTÓGRAFO DE TREN**

Coordinadores:

Prof. Marco Ceccarelli (Universidad Cassino)  
Prof. Giuseppe Carbone (Universidad Cassino)  
Prof. Cristina Castejón (Universidad Carlos III)

Autor:

Alba López Muñoz

AÑO ACADÉMICO 2015 / 2016

## **Agradecimientos**

En primer lugar, me gustaría agradecer la oportunidad de completar mis estudios y comenzar con la realización de este TFG (Trabajo Fin de Grado) en el LARM (Laboratorio di Robotica e Meccatronica) de la Universita' di Cassino e del Lazio Meridionale (Cassino, Italia) y disponer de la ayuda de todos los miembros que lo componen durante el programa de estudios Erasmus 2014 / 2015.

En segundo lugar, a mi coordinadora Cristina por la ayuda ofrecida para poder finalizar este proyecto.

## Resumen

Los vehículos ferroviarios de alta velocidad son una forma cómoda y rápida de transporte. Entre todos los tipos de pantógrafos existentes, los asimétricos han demostrado ser una solución adecuada para la interacción con la catenaria en la mayoría de los países.

Los principales problemas son mantener este equilibrio cuando se incrementa la velocidad de circulación, y que la fuerza de contacto entre ambos componentes sea mínima para que se produzca un reducido desgaste de las partes en contacto.

Es por ello, que en este trabajo se realiza un estudio cinemático y dinámico de un pantógrafo asimétrico de tren con los programas Matlab® y SolidWorks® ya que la utilización de estos software constituyen una alternativa para el diseño.

# Índice

Índice de figuras.....	7
Índice de tablas.....	9
Índice de gráficas.....	10
 CAPÍTULO 1: Introducción .....	 11
1.1 Motivación.....	11
1.2 Objetivos .....	11
1.3 Estructura del trabajo.....	12
 CAPÍTULO 2: El pantógrafo.....	 14
2.1 Tipos de pantógrafos.....	14
2.1.1 Pantógrafo simétrico poligonal .....	15
2.1.2 Pantógrafo poligonal de doble etapa .....	17
2.1.3 Pantógrafo asimétrico.....	19
2.1.4 Pantógrafo asimétrico de doble etapa .....	25
2.2 Características de los pantógrafos .....	26
 CAPÍTULO 3: Análisis de funcionamiento del pantógrafo DSA 250.09.....	 28
3.1 El pantógrafo DSA 250.09.....	28
3.2 Esquema cinemático .....	29
3.3 Análisis cinemático del mecanismo.....	32
3.4 Análisis dinámico no lineal del mecanismo .....	34
3.5 Características del software Matlab®.....	35
3.6 Estudio del pantógrafo con el programa Matlab®.....	36

3.6.1 Algoritmo.....	37
3.6.2 Diagrama de flujo.....	38
3.6.3 Resultados.....	39
 CAPÍTULO 4: Modelado tridimensional del pantógrafo DSA 250.09.....	 40
4.1 Características del software de simulación SolidWorks®.....	40
4.2 Modelado SolidWorks®.....	41
4.3 Modalidades de funcionamiento simulado.....	42
4.4 Resultados de simulación.....	43
4.4.1 Estudio del contacto pantógrafo – catenaria en el punto M.....	44
4.4.2 Estudio del par aportado por la valona.....	46
4.5 Alternativas de diseño .....	47
 CAPÍTULO 5: Entorno socioeconómico.....	 49
 CAPÍTULO 6: Presupuesto.....	 51
6.1 Presupuesto inicial.....	51
6.1.1 Coste del personal.....	51
6.1.2 Coste de elementos software y hardware.....	52
6.1.3 Coste total del proyecto.....	53
6.2 Presupuesto final.....	51
6.2.1 Coste del personal.....	51
6.2.2 Coste de elementos software y hardware.....	52
6.2.3 Coste total del proyecto.....	53
 CAPÍTULO 7: Conclusiones.....	 57

7.1 Trabajos futuros.....	57
CAPÍTULO 8: Bibliografía....	59

# Índice de figuras

Fig. 2.1 - Esquema componentes de un tren.....	14
Fig. 2.2 - Pantógrafo simétrico poligonal .....	16
Fig. 2.3 - Cabeza motriz del tren de alta velocidad ETR 500 con pantógrafo simétrico poligonal .....	17
Fig. 2.4 a) - Pantógrafo asimétrico de doble etapa: vista del conjunto... ..	17
Fig. 2.4 b) - Pantógrafo asimétrico de doble etapa: detalle del captador . .....	18
Fig. 2.5 – Gráfica comparativa de la elevación vertical del punto de unión Ménsula- Hilo de contacto .....	18
Fig. 2.6 - Amplitud de la deformación del hilo de contacto .....	19
Fig. 2.7 – Pantógrafo asimétrico.... ..	20
Fig. 2.8 – Vista lateral de los componentes del pantógrafo... ..	21
Fig. 2.9 – Vista frontal del esquema de un pantógrafo .....	21
Fig. 2.10 – Tren CC6570 conservado por L'APCC 6570 (Association pour la Préservation de la CC 6570) en viaje desde Avignon a Lourdes .....	24
Fig. 2.11 – Pantógrafo de doble etapa AMDE .....	25
Fig. 3.1 – Esquema pantógrafo DSA 250.09 .....	29
Fig. 3.2 – Cinemática del pantógrafo..... ..	31
Fig. 3.3 – Sistema neumático de accionamiento y del amortiguador..... ..	31
Fig. 3.4 – Mesilla del pantógrafo... ..	32
Fig. 4.1 – Modelo del pantógrafo DSA 250.09 diseñado en SolidWorks®.....	42
Fig. 4.2 – Modelo del pantógrafo DSA 250.09 diseñado en SolidWorks®.....	43
Fig. 4.3 – Modelo del pantógrafo DSA 250.09 diseñado en SolidWorks®.....	43

Fig. 4.4 – Punto donde se aplica la fuerza M.....	44
Fig. 4.5 – Par valona.....	46
Fig. 5.1 – Maglev Shanghai .....	50
Fig. 5.2 – Maglev Yamanashi .....	50



# Índice de tablas

Tabla 2.1 - Características de los pantógrafos DSA utilizados en España.....	15
Tabla 2.2 - Clases de trenzas de conexión de Cyee Spain... ..	22
Tabla 3.1 - Principales características del pantógrafo DSA 250.09.....	28
Tabla 6.1 - Coste del personal en el presupuesto inicial.....	52
Tabla 6.2 - Coste de SW y HW en el presupuesto inicial.....	53
Tabla 6.3 - Coste total del proyecto.....	53
Tabla 6.4 - Coste del personal en el presupuesto final.....	54
Tabla 6.5 - Coste de SW y HW en el presupuesto final.....	55
Tabla 6.6 - Coste total del proyecto.....	56

## Índice de gráficas

Gráfica 4.1 – Desplazamiento lineal del punto M.....	45
Gráfica 4.2 – Gráfica de velocidad del punto M....	45
Gráfica 4.3 – Gráfica de la aceleración del punto M....	46
Gráfica 4.4 – Velocidad angular.....	47
Gráfica 4.5 – Aceleración angular.....	47

# CAPÍTULO 1

## Introducción

En este capítulo se detallan los objetivos marcados para la realización de este TFG (Trabajo Fin de Grado) y en qué consisten los capítulos que lo forman.

### 1.1 Motivación

El ferrocarril tuvo su desarrollo en la primera mitad del siglo XIX como parte de la Revolución industrial, lo que causó una transformación completa de la sociedad al permitir el transporte de personas y cargas a un bajo costo y de forma regular y segura. Fue una de las herramientas fundamentales para la expansión de las economías y la ocupación de territorios.

Actualmente, el ferrocarril supone un medio de transporte económico, con alta velocidad de circulación y una baja contaminación porque realiza un menor consumo de combustible.

Para abaratar costes en el sector y que se consigan precios más competitivos, sería necesario mejorar los sistemas de control y de los componentes para reducir el mantenimiento y los fallos manteniendo o mejorando la calidad. Es por ello, que el sector ferroviario alcanza niveles considerables de eficiencia desde el punto de vista de seguridad, confort y actuación.

### 1.2 Objetivos

El objetivo de este trabajo es la determinación del ángulo mínimo de la manivela motriz que produzca el par máximo que aporte la valona para levantar el pantógrafo y mantener el contacto con la catenaria. Para ello, se han desarrollado con el programa Matlab® las ecuaciones de movimiento del modelo de barras rígidas de un

pantógrafo actual empleado en España y las ecuaciones que rigen su comportamiento dinámico.

A partir de los resultados obtenidos, se simulará la abertura del pantógrafo cuando la catenaria genera una fuerza de 100 N y cuando la valona aporta el par máximo para analizar las correspondientes gráficas con el software SolidWorks®.

### **1.3 Estructura del trabajo**

En el capítulo 1 se presenta la motivación de este trabajo y los objetivos generales y particulares, así como la estructura del documento.

El Capítulo 2 refleja la evolución de los pantógrafos a lo largo de la historia. Se ha estudiado los diferentes tipos de pantógrafos utilizados en España, y se ha verificado que tienen las mismas características que los pantógrafos utilizados en otros países.

Los capítulos 3 y 4 se basan en el estudio del pantógrafo DSA 250.09 que cumple con la norma UNE-EN 50206-1 Aplicaciones ferroviarias - Material rodante - Pantógrafos: Características y ensayos - Parte 1: Pantógrafos para vehículos de línea principal, que define las características generales que se deben aplicar a los pantógrafos para permitir la captación de corriente de la catenaria. También especifica los ensayos a los que se deben someter los pantógrafos a excepción de los aisladores.

En el capítulo 3 se ha hecho un estudio cinemático con las ecuaciones de cierre y sus derivadas temporales, y un estudio dinámico con las ecuaciones de Lagrange. Los resultados se han obtenido mediante el software Matlab®.

En el capítulo 4, a partir de unas medidas aproximadas del pantógrafo DSA 250.09 se realiza una representación gráfica y simulación en SolidWorks®. Con los datos obtenidos en el capítulo anterior, se obtienen las gráficas de posición, velocidad y aceleración en la abertura del pantógrafo desde la posición de reposo hasta el contacto con la catenaria cuando esta ejerce una fuerza de 100 N, y las gráficas de

velocidad y aceleración para el par máximo que aporta la valona haciendo que el pantógrafo se levante. Además, se proponen unas alternativas al estudio realizado.

En el capítulo 5 para situar este trabajo en un entorno socioeconómico se realiza una comparación entre las características de la serie de pantógrafos DSA que es la sometida a estudio, con el tren de levitación magnética que es el más innovador en el mercado en estos momentos.

En el capítulo 6 se detalla el presupuesto inicial y final del trabajo.

En el capítulo 7 se expondrán las conclusiones tras haber realizado todos los análisis, y se mencionan los posibles trabajos futuros.

En el capítulo 8 se hace referencia a todas las fuentes de información.

## CAPÍTULO 2

### El pantógrafo

#### 2.1 Tipos de pantógrafos

Un pantógrafo ferroviario es un dispositivo encargado de transmitir la energía eléctrica que proporciona la fuerza de tracción a locomotoras, tranvías y otros vehículos con motores eléctricos. Consiste en un mecanismo articulado que se encarga de mantener a las pletinas de frotamiento en constante contacto con la línea de alta tensión (catenaria), bajo la que desliza. Está situado en el techo de la locomotora y la altura se regula de forma automática [Jiménez 2012].

A continuación, se definen los componentes que participan en la transmisión mediante el contacto pantógrafo-catenaria de la figura 2.1 [Adif, 2015].

- Catenaria: es la línea aérea de alimentación que transmite energía eléctrica a las locomotoras u otro material motor.
- Tren: medio de transporte que circula sobre raíles, compuesto por uno o más vagones arrastrados por una locomotora.
- Hilo de contacto: son los conductores de la línea aérea con los que hacen contacto los pantógrafos.
- Péndolas: elementos verticales que mantienen los hilos de contacto a una altura constante.

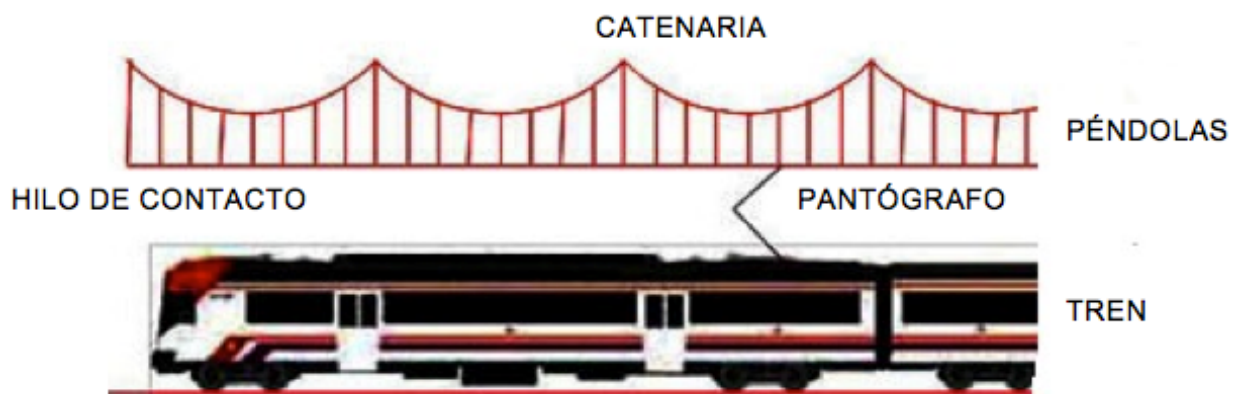


Fig. 2.1 - Esquema componentes de un tren [Adif, 2015]

Algunos de los pantógrafos que se usan en los trenes de la compañía operadora RENFE en España son indicados en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 - Características de los pantógrafos DSA utilizados en España [Stemmann Technik, 2014], [RENFE, 2014]

<b>Pantógrafos</b>	<b>Material de frotadores</b>	<b>Velocidad máxima [km/h]</b>	<b>Tensión de catenaria [kV]</b>
<b>1DSA250.90</b>	cobre	200	3
<b>0DSA250.90</b>	cobre	220	3/15
<b>0DSA250.09</b>	cobre	220	3/25
<b>DSA380EU</b>	carbón	330	25
<b>DSA380.03</b>	carbón	330	25

Se distinguen cuatro tipos: pantógrafo simétrico poligonal, pantógrafo poligonal de doble etapa, pantógrafo asimétrico y pantógrafo asimétrico de doble etapa. Se ha considerado importante analizar sus características, el país en que se inventaron, los componentes y las ventajas y desventajas entre las dos categorías, asimétricos y simétricos. A continuación se describe cada uno de ellos.

### 2.1.1 Pantógrafo simétrico poligonal

Los primeros pantógrafos que se emplearon tenían una estructura simétrica poligonal que consistía en un polígono articulado cuyo movimiento absorbía la

diferencia de altura entre la vía y la catenaria, los movimientos verticales y los movimientos transversales producidos por la dinámica del funcionamiento. Solo era necesario un pantógrafo por tren porque su movimiento era válido en las dos direcciones.

El polígono articulado (figura 2.2) se compone de una mesilla superior en la que se encuentran los dos frotadores para mantener el contacto con la catenaria, y en la parte inferior están los aisladores eléctricos para aislarlo del techo de las unidades ferroviarias. Permitían alcanzar velocidades máximas de 120km/h por el elevado peso del conjunto mecánico. Fue un diseño utilizado durante décadas sin apenas cambios.

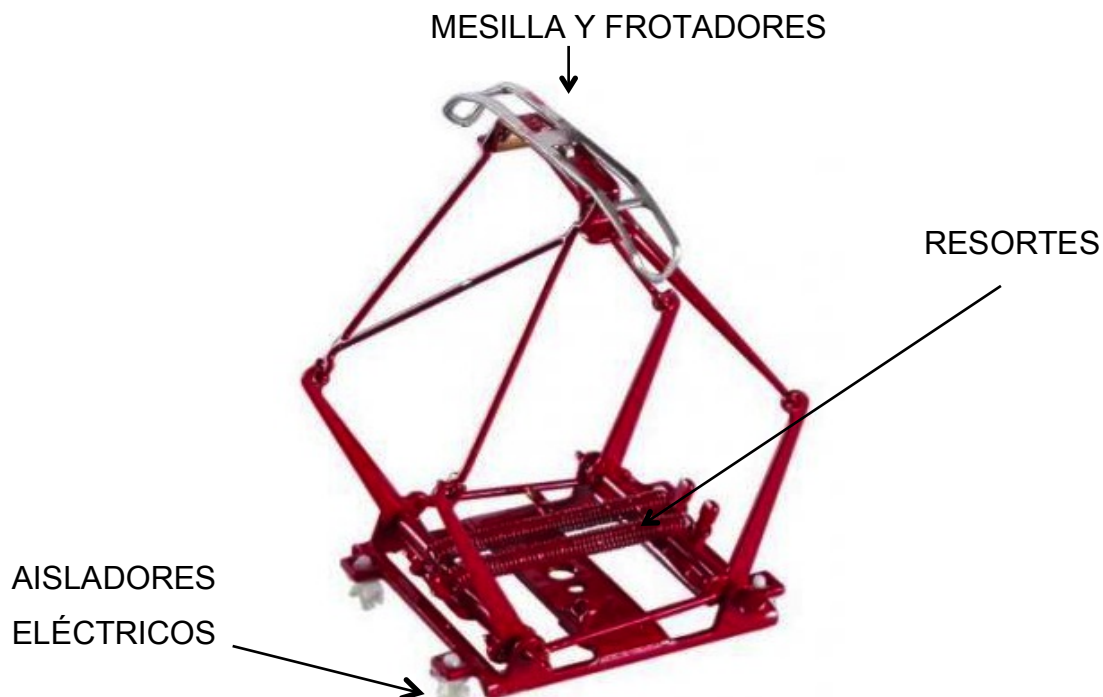


Fig. 2.2 - Pantógrafo simétrico poligonal [Vit rains models, 2014]

Actualmente, se emplean en pocos vehículos ya que la mayoría de compañías ferroviarias emplean los pantógrafos asimétricos porque alcanzan velocidades superiores y su masa es menor. Un ejemplo podemos encontrarlo en la administración italiana FS (figura 2.3) que aún los emplea en vehículos modernos [Bianchi y Taxi, 1992].





Fig. 2.3 - Cabeza motriz del tren de alta velocidad ETR 500 con pantógrafo simétrico poligonal  
[Donzello, 2015]

### 2.1.2 Pantógrafo poligonal de doble etapa

El pantógrafo poligonal de doble etapa se construyó en 1969 en Francia por la SNCF (Société Nationale des Chemins de Fer) para dar solución al problema de captación de corriente a alta velocidad. Para ello, se empleó un nuevo captador con masa reducida. Uno de los trenes en los que se probó fue en el CC 21001 de la SNCF (Société Nationale des Chemins de Fer) que instaló un pantógrafo poligonal (figura 2.4 a) con un pantógrafo asimétrico simple en el lugar de la mesilla (figura 2.4 b), de muy corta longitud de desarrollo y modelo FD (faible developpement = bajo desarrollo) [Borreguero, 2010].



Fig. 2.4 a) - Pantógrafo asimétrico de doble etapa: vista del conjunto [Borreguero, 2010]

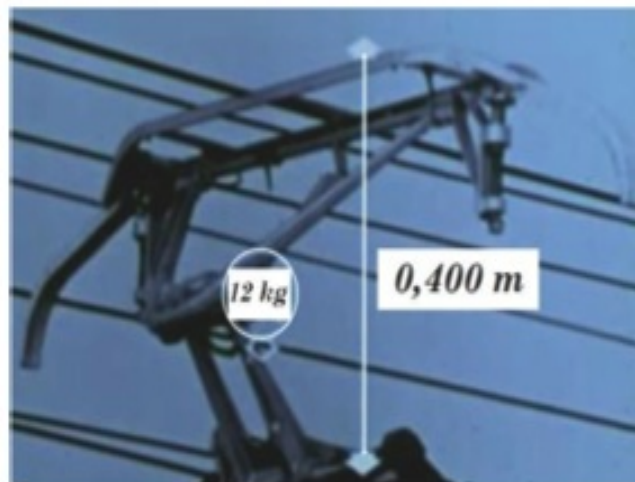


Fig. 2.4 b) - Pantógrafo asimétrico de doble etapa: detalle del captador [Borreguero, 2010]

Para comparar modelo FD (*faible developpement* = bajo desarrollo) con un pantógrafo convencional como el modelo AM 18 sobre su comportamiento con la catenaria, se instalan potenciómetros en las ménsulas para medir la elevación del hilo de contacto. El pantógrafo AM 18 obtiene mayor altura que el pantógrafo poligonal de doble etapa FD cuando aumenta la velocidad como vemos en la figura 2.5.

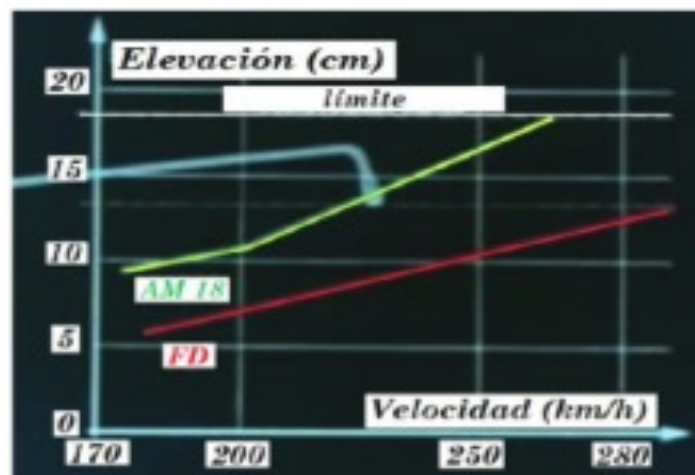


Fig. 2.5 – Gráfica comparativa de la elevación vertical del punto de unión Ménsula-Hilo de contacto [Borreguero, 2010]

Con la catenaria convencional y siendo la altura del hilo de contacto variable, el pantógrafo se articula para absorber las diferencias de altura que se presentan. Un ejemplo es cuando el tren atraviesa un paso elevado para vehículos.

En LAV (Línea Alta Velocidad) con altura de hilo constante, el pantógrafo poligonal de doble etapa FD se articula siguiendo las vibraciones del hilo porque la altura del pantógrafo simétrico poligonal permanece constante.

En la figura 2.6 vemos como los pantógrafos de doble etapa reducen la amplitud de vibración del hilo de contacto. Un pantógrafo simple aumenta la amplitud al aumentar la velocidad, mientras que el pantógrafo de doble etapa tiene aumentos de amplitud menores.

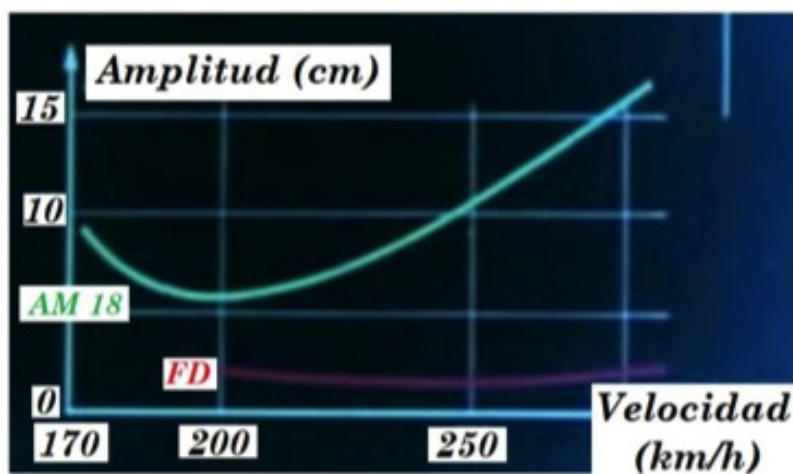


Fig. 2.6 - Amplitud de la deformación del hilo de contacto [Borreguero, 2010]

### 2.1.3 Pantógrafo asimétrico

Los pantógrafos asimétricos denominados también pantógrafos Z o medios pantógrafos (figuras 2.7) consiguieron mejorar las características en la toma de corriente. Esto fue un gran avance para las altas velocidades que se alcanzaban.

Los pantógrafos asimétricos y simétricos se han utilizado de forma conjunta en las últimas décadas. Han conseguido mejorar en las características mecánicas y dinámicas para la reducción de masa. Hoy en día, en la mayoría de locomotoras son los utilizados ya que resisten grandes esfuerzos dinámicos a muy altas velocidades.



Fig. 2.7 – Pantógrafo asimétrico [Donzello, 2015]

El pantógrafo se tiene que diseñar con los siguientes criterios de comportamiento [Internacional Railway Journal, 1992]:

- Estructura geométrica según las especificaciones de cada tren: existen diferencias entre los criterios dinámicos necesarios para un pantógrafo de tranvía y un pantógrafo de tren de alta velocidad (LAV), ya que la interacción del sistema pantógrafo-catenaria debe ser continua. Al incrementar la velocidad, mantener el contacto es muy importante porque de esto depende la calidad de transmisión de energía ya que limita la velocidad máxima que se alcanza con este sistema.
- Materiales con buen comportamiento a la fatiga y condiciones ambientales: los frotadores son contruidos con carbón para tener un buen comportamiento frente al desgaste, buena conductividad térmica y eléctrica, elevada resistencia, buenas propiedades de amortiguación, contacto de deslizamiento poco ruidoso y sin radio-interferencias.
- Reducido mantenimiento, alta disponibilidad y fiabilidad: fácil montaje, piezas constructivas complejas y libre de mantenimiento durante la vida del frotador.

Los componentes principales de los pantógrafos asimétricos se observan en las figuras 2.8 y 2.9 [Arriola y Ciordia 1981].

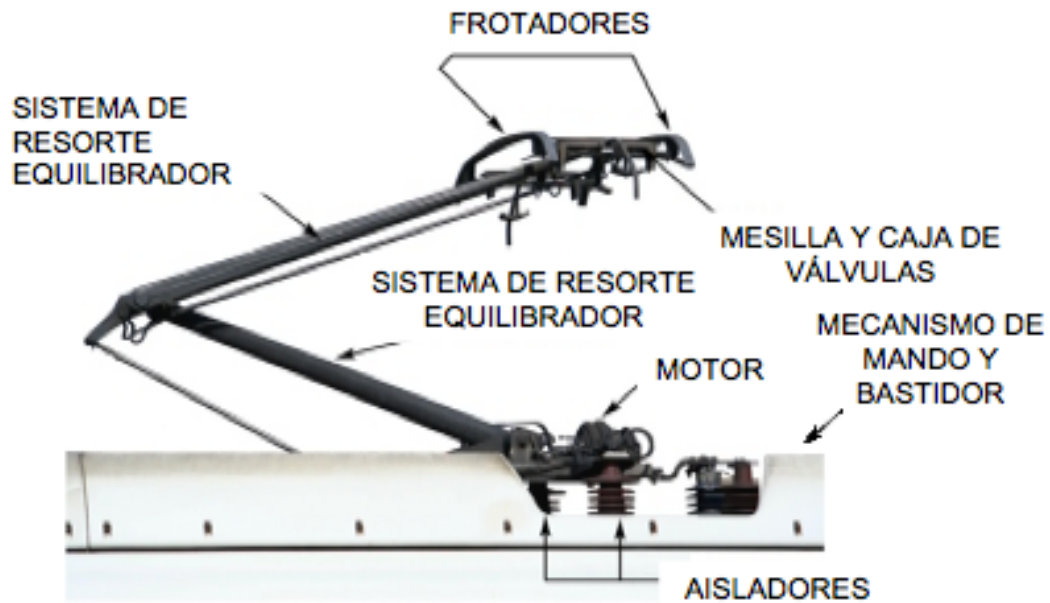


Fig. 2.8 – Vista lateral de los componentes del pantógrafo [Centro Politécnico Superior, 2015]

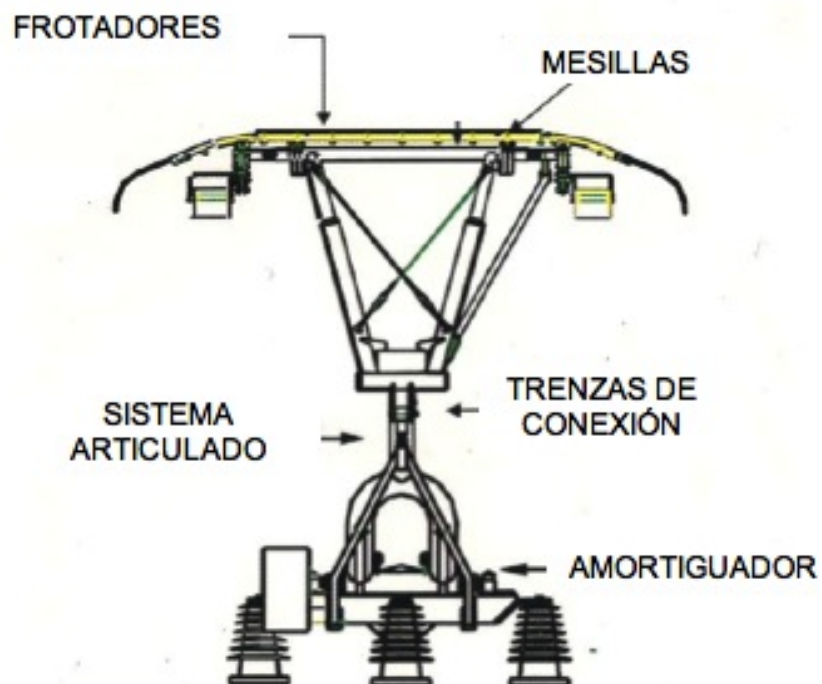


Fig. 2.9 – Vista frontal del esquema de un pantógrafo [Adif, 2015]

- Mesilla: estructura superior del pantógrafo que sirve de soporte para los frotadores de captación. En sus extremos transversales se instalan los cuernos o

trocadores para asegurar un paso suave al hilo de contacto.

- Frotador: capta la corriente del hilo de contacto. Está unido elásticamente al pantógrafo por pistones provistos de muelles de recuperación, los cuales absorben las vibraciones y los movimientos de pequeña amplitud del hilo de contacto.
- Sistema articulado: conjunto de eslabones y brazos que forman el pantógrafo y permiten variar su altura desde la posición de reposo hasta la altura del contacto con la catenaria.
- Amortiguador: reduce los movimientos de bajada del pantógrafo para disminuir las variaciones de la fuerza de contacto entre el pantógrafo y la catenaria. Mejora la calidad de captación de corriente. El amortiguador es de tracción, es decir, sólo trabaja cuando el pantógrafo está bajando.
- Trenzas de conexión: cables de cobre flexible que aseguran la transmisión de corriente por el pantógrafo. Un ejemplo de los valores que pueden adquirir las trenzas de conexión están en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 - Clases de trenzas de conexión de Cyee Spain [Cyee, 2015]

Sección [mm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [A]	Sección [mm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [A]
<b>0.1</b>	5	35	195
<b>0.25</b>	9	50	250
<b>0.5</b>	12.5	70	300
<b>0.75</b>	15	95	360
<b>1</b>	18	120	420
<b>1.5</b>	21	150	480



<b>2.5</b>	30	185	570
<b>4</b>	40	200	640
<b>8</b>	70	400	950
<b>10</b>	85	500	1100
<b>16</b>	120	625	1300
<b>25</b>	155	800	1800

- Caja de válvulas: regula las velocidades de subida y bajada del pantógrafo para que las bandas de contacto alcancen suavemente el hilo de contacto de la catenaria y obtengan un despegue rápido cuando se efectúe la bajada sin golpear fuerte los topes de reposo.
- Bastidor y soportes aislantes: el bastidor está fabricado de acero y fijado al techo por aisladores que aíslan eléctricamente el techo del vehículo. El bastidor soporta el sistema articulado, el punto de agarre de los resortes, el cilindro neumático y los topes elásticos para el pantógrafo plegado.
- Mecanismo de mando: está formado por un cilindro neumático fijado al bastidor y forma parte del control del pantógrafo. Los resortes aportan la energía suficiente para efectuar la bajada del pantógrafo, pero el aire comprimido del cilindro anula el esfuerzo transmitido de los resortes cuando asciende el pantógrafo. El movimiento comienza en el cilindro. Dentro de él, se desliza un pistón solicitado en una de sus caras por los resortes de descenso y en la otra, por el aire comprimido contenido en la cámara.
- Sistema de resortes equilibradores: modifican la geometría de la estructura para obtener una fuerza de contacto adecuada. Trabajan en paralelo para equilibrar la masa del sistema articulado y conseguir la bajada y subida del pantógrafo.

Las principales ventajas de los pantógrafos asimétricos son las siguientes [Rodríguez, 2010]:

- Captar electricidad sin interrupciones (despegues) a velocidades próximas a los 200 km/h.
- Un menor número de barras permite reducir en masa e inercias.
- El sistema de accionamiento neumático corrige las desviaciones geométricas producidas durante el ascenso y el descenso del pantógrafo.
- Reducir el número de articulaciones ya que dan lugar a holguras y a un funcionamiento incorrecto.
- Disminuye el mantenimiento y los costes de producción.

Generalmente, las locomotoras eléctricas poseen un pantógrafo asimétrico en cada extremo (figura 2.10). Dependiendo de la dirección que tome la locomotora, funcionará uno u otro. Las locomotoras poli-corrientes tienen más de dos pantógrafos en el techo para tomar electricidad a diferentes tensiones y frecuencias porque utilizan corrientes diferentes.



Fig. 2.10 – Tren CC6570 conservado por L'APCC 6570 (Association pour la Préservation de la CC 6570) en viaje desde Avignon a Lourdes [Foro trenes, 2012]



### 2.1.4 Pantógrafo asimétrico de doble etapa

El pantógrafo asimétrico de doble etapa se caracteriza por mejorar el contacto con la catenaria a altas velocidades en los trenes TGV – PSE. Está formado por dos pantógrafos asimétricos simples. El pequeño, está situado en el extremo del pantógrafo grande. El pantógrafo grande es un pantógrafo clásico sin frotador que absorbe las diferencias de altura del hilo de contacto. El pantógrafo pequeño recorre como máximo 400 mm y sirve para compensar la deformación sinusoidal del hilo de contacto entre soportes [Faiveley transport, 2011].

Las locomotoras que circulan con los pantógrafos asimétricos de doble etapa lo hacen por trayectos donde el hilo de contacto tiene una altura casi constante, por lo que el pantógrafo superior varía unos 200 mm de altura cuando pasa por las ménsulas (picos de baja amplitud) y el pantógrafo inferior varía unos 800 mm al aproximarse a los túneles (variación lenta de gran amplitud). Esto produce una masa dinámica bastante baja. Un ejemplo es el pantógrafo AMDE de Faiveley desarrollado desde 1972 con unos 13 kg de masa (figura 2.11).



Fig. 2.11 – Pantógrafo de doble etapa AMDE [Faiveley transport, 2011]

## 2.2 Características de los pantógrafos

Las longitudes y distancias características del pantógrafo son [RENFE, 2004]:

- Desarrollo del pantógrafo: recorrido que hace el pantógrafo desde la posición de reposo hasta la altura máxima que puede alcanzar en contacto con la catenaria. El desarrollo mínimo del pantógrafo es de 1.700 mm.
- Altura de captación mínima: distancia mínima a la que el pantógrafo toma corriente en condiciones de seguridad. El valor mínimo establecido por RENFE es de 4.600 mm.
- Altura de captación máxima: distancia máxima a la que el pantógrafo toma corriente en condiciones de seguridad. El valor establecido por RENFE es de 6.000 mm.

Las mejores condiciones de captación de corriente se obtienen cuanto más constante esté la altura del hilo de contacto sobre el plano de la vía y sobre el pantógrafo. Esto es posible en las LAV (Línea Alta Velocidad) que optimizan al máximo el contacto pantógrafo - catenaria. En las líneas convencionales, la altura del hilo de contacto varía. En este caso, es necesario que el pantógrafo tenga una fuerza estática para elevar la mesilla y que no se produzcan separaciones en el contacto.

Al tener en cuenta las condiciones dinámicas del contacto pantógrafo – catenaria, es necesario reducir la masa del pantógrafo. Uno de los puntos donde es importante reducir la masa es en la mesilla [Arriola y Ciordia, 1981].

Para poder elegir los materiales que se van a utilizar, los principales aspectos a considerar son la velocidad de la locomotora y la corriente de captación. Cuando se ha empleado el acero en la estructura y en los brazos del pantógrafo, se consiguen velocidades y corrientes de captación bajas por lo que este material ha sido reemplazado por el aluminio. Cuando se utiliza el aluminio, se consigue reducir la masa y la inercia de todos los elementos estructurales además de obtener mayores velocidades y mayor intensidad de corriente captada [Mallard, 1991].

El funcionamiento correcto del pantógrafo depende de los frotadores. Están situados en el arco de la mesilla y en contacto con la catenaria. Son los elementos que captan la corriente. Los materiales que se emplean, son en función de la corriente de captación. Entre ellos se encuentran [Donzello, 2015]:

- Cobre.
- Acero.
- Aluminio.
- Grafito.
- Grafito con impregnación de cobre.

Actualmente, el material más empleado para altas corrientes de captación es el grafito con impregnaciones metálicas.

Las ventajas de los frotadores de grafito respecto a las de metal son [Mallard, 1991]:

- Mayor duración.
- Menor desgaste del hilo de contacto debido a la pátina de grafito impregnada que lo protege de la oxidación.
- Reduce la necesidad de engrasado y mantenimiento (autolubricación).
- Bajo nivel de ruidos durante la circulación.
- Resistencia a altas temperaturas y choques térmicos.
- Alta calidad de captación de corriente.

Para un estudio más en profundidad de los pantógrafos, se procederá a realizar sobre un modelo concreto, una simulación y análisis en SolidWorks® y una programación en Matlab®.

## CAPÍTULO 3

### Análisis de funcionamiento del pantógrafo DSA 250.09

#### 3.1 El pantógrafo DSA 250.09

El pantógrafo DSA 250.09 se emplea en España desde el año 2006 por los trenes de la compañía operadora RENFE. El material utilizado para los frotadores es cobre. El pantógrafo es un sistema articulado que está sujeto a un patín, presionándolo contra la catenaria, bajo la que se desliza. Está situado en el techo de la unidad tractora y es regulable en altura de forma automática para alcanzar la catenaria independientemente de la altura a la que se encuentre el hilo conductor aéreo.

Entre los tipos de pantógrafos mencionados anteriormente, el DSA 250.09 es un pantógrafo asimétrico. En la figura 3.1 se observa en la parte superior la mesilla con los dos frotadores de cobre y entre ellos, el cuerno o trocador que evita enganchar el hilo de contacto, y en la parte inferior, el amortiguador y los tres sistemas aisladores (elementos de color rojo) que irían sobre el techo de la locomotora. Además, se puede apreciar la estructura completa de este pantógrafo.

Las características del pantógrafo DSA 250.09 son las que nos encontramos en la tabla 3.1 [Stemmann Technik, 2014].

Tabla 3.1 – Principales características del pantógrafo DSA 250.09

<b>Tensión nominal [kV]</b>	<b>Corriente nominal [A]</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Velocidad máxima [km/h]</b>
<b>3/25</b>	2000	100	220



Fig. 3.1 – Esquema pantógrafo DSA 250.09 [Stemmann Technik, 2014]

### 3.2 Esquema cinemático

El pantógrafo es el elemento que permite al tren captar la energía eléctrica. La transmisión de corriente eléctrica se hace mediante el contacto continuo entre el tren y la línea aérea, siempre que haya una fuerza de contacto óptima y constante. Para mantener un contacto estable con la catenaria, el pantógrafo (mecanismo cinemático) está dotado de uno o más estados de suspensión capaces de adaptarse a cualquier condición de trabajo.

El modelo más simple, es un modelo lineal de masas concentradas en el que solo se considera el movimiento vertical del mecanismo. Se han considerado tres hipótesis [Mora, 2011]:

1. Movimiento en el plano: el pantógrafo queda definido en las coordenadas cartesianas  $x$ ,  $y$  y por ser simétrico en cuanto a la geometría y porque las cargas a las que está sometido son en el eje  $y$  (dirección de la gravedad).

2. Sólidos rígidos: se asume esta hipótesis para que dos puntos del mismo sólido tengan constante la distancia entre ellos.
3. Uniones ideales: el pantógrafo se considerará un mecanismo ideal, es decir, no existirá ni fricción ni holguras en los pares de rotación entre las barras.

Asumiendo estas hipótesis, el pantógrafo se muestra como un mecanismo simplificado en un esquema de barras. Consta de siete eslabones de diferente longitud y masa, unidos entre sí mediante pares cinemáticos de rotación. Se puede separar en dos partes (figura 3.2). Las barras 1, 4, 5 y 6 forman el lazo superior, mientras que las barras 1, 2 y 3 forman el lazo inferior. La parte superior realiza un movimiento de traslación vertical y la parte inferior se compone de dos niveles de suspensiones situados en la base del pantógrafo que permiten un mecanismo menos rígido para adaptarse a la catenaria durante su contacto. La pérdida de contacto entre la catenaria y el pantógrafo produce arcos eléctricos. Estos provocan un desgaste prematuro de ambos componentes y una alimentación discontinua de los motores de tracción eléctrica. Las tiras de contacto están fabricadas en carbón o cobre mientras que los arcos en acero o una aleación de aceros.

Los factores más influyentes en el funcionamiento óptimo del contacto son la temperatura, el material de construcción, la velocidad del tren y la fuerza de contacto pantógrafo - catenaria.

Se considerarán como posiciones del pantógrafo las siguientes: *reposo*, cuando no está en contacto con la línea aérea, y *levantado*, cuando está en contacto con el hilo.

La base del pantógrafo está fijada al bastidor colocado en la parte superior del tren donde hay un resorte torsional para indicar la rigidez que ofrece al giro el sistema de accionamiento encargado de levantar el pantógrafo, y un amortiguador que se puede observar también en la figura 3.3.

Las barras 3 y 4 están unidas con una unión rígida ya que en la realidad serían un único eslabón.

La mesilla está constituida por las barras 6 y 7, unidas al resto del cuerpo del

pantógrafo mediante dos resortes lineales y unida a la catenaria mediante los frotadores (figura 3.4).

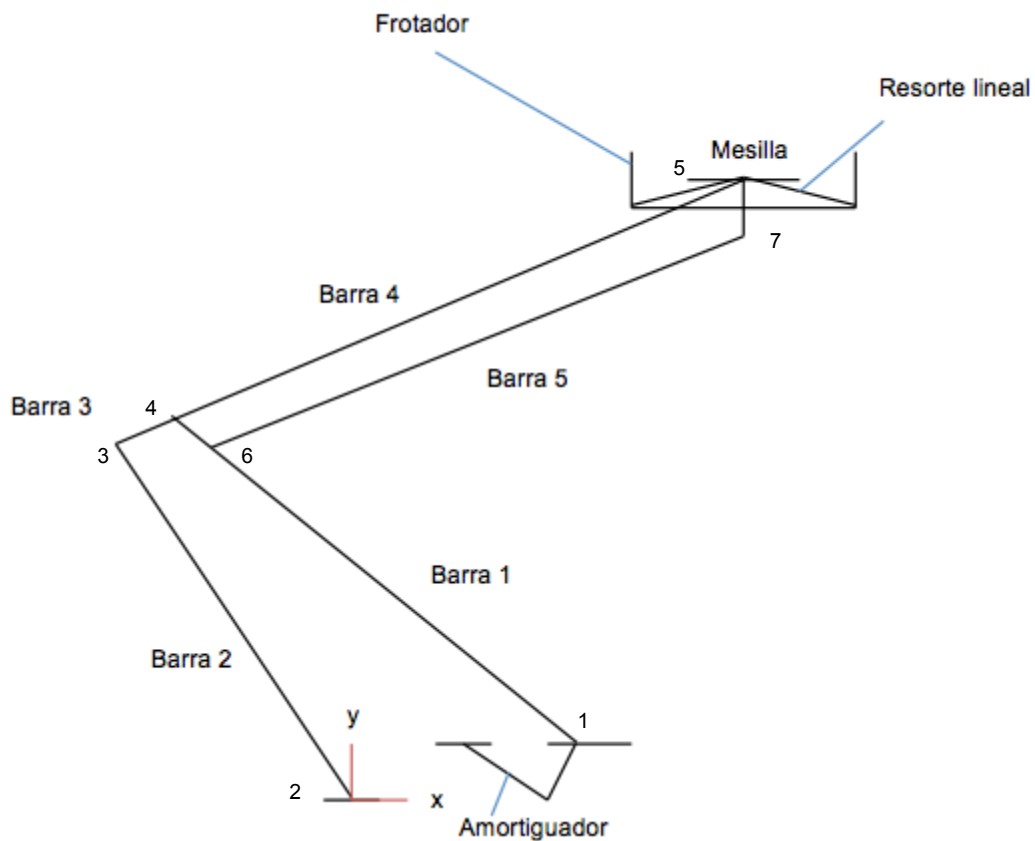


Fig. 3.2 – Cinemática del pantógrafo

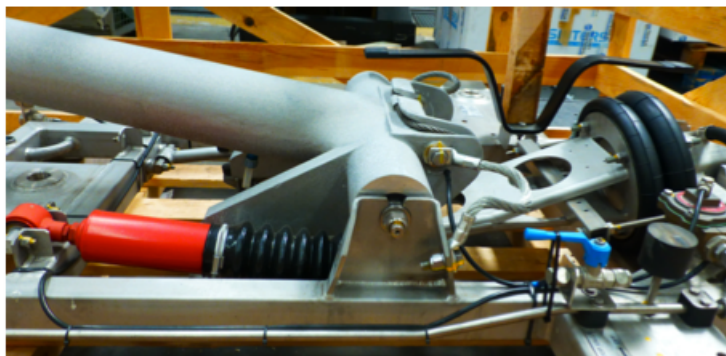


Fig. 3.3 – Sistema neumático de accionamiento y del amortiguador [European Railway Server,2010]

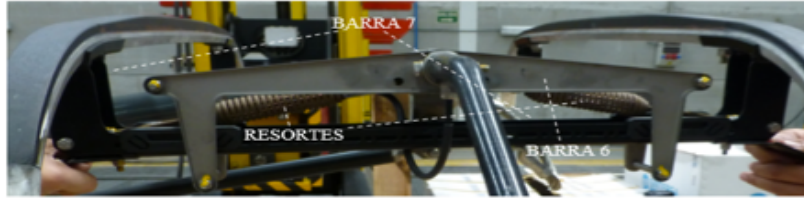


Fig. 3.4 – Mesilla del pantógrafo [European Railway Server, 2010]

### 3.3 Análisis cinemático del mecanismo

Para realizar el análisis del pantógrafo, no se va a tener en cuenta la mesilla para que el estudio sea sobre un mecanismo de 1GDL (grado de libertad). De manera que el pantógrafo a modelar estará compuesto de seis barras. El ángulo  $\theta$  es el ángulo girado por la barra 1 respecto la horizontal. Este ángulo se considerará la variable independiente, y mediante el método analítico de ecuaciones de cierre se calculará dicha incógnita [López y Ceccarelli, 2013]. El sistema de referencia está fijado en la barra 2. Para calcular cualquier punto en función de la coordenada independiente se va a utilizar relaciones no lineales por usar lazos cerrados de barras.

$$\text{coordenada independiente} = \theta$$

$$\text{coordenadas dependientes} = (\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$$

- Posición: se considera que la velocidad y la aceleración son nulas en la posición inicial. Todos los ángulos varían de 0 a  $\pi$  radianes.

$$x_1 + L_1 \cos \theta - L_2 \cos \theta_2 - L_3 \cos \theta_3 = 0$$

$$y_1 + L_1 \sin \theta - L_2 \sin \theta_2 - L_3 \sin \theta_3 = 0$$

$$x_4 + L_4 \cos \theta_4 - x_6 - L_5 \cos \theta_5 - L_6 \cos \theta_6 = 0$$

$$y_4 + L_4 \sin \theta_4 - y_6 - L_5 \sin \theta_5 - L_6 \sin \theta_6 = 0$$

$$\theta_4 = \theta_3 + \theta_{34}$$

$$x_6 = x_1 + L_1 \cos(\theta_r + \theta)$$

$$y_6 = y_1 + L_1 \sin(\theta_r + \theta)$$



$\theta_{34}$ : ángulo constante entre las barras 3 y 4.

$\theta_r$ : ángulo fijo entre las barras 1 y 5.

- Velocidad: para poder resolver estas ecuaciones, se necesita conocer las relaciones entre las velocidades angulares de cada barra y la velocidad angular de la barra 1. Las velocidades angulares solo van a depender de la variable independiente  $\theta$  y de su derivada en el tiempo  $\dot{\theta}$ .

$$L_1 \sin \theta = L_2 \frac{d\theta_2}{d\theta} \sin \theta_2 + L_3 \frac{d\theta_3}{d\theta} \sin \theta_3$$

$$-L_1 \cos \theta = -L_2 \frac{d\theta_2}{d\theta} \cos \theta_2 - L_3 \frac{d\theta_3}{d\theta} \cos \theta_3$$

$$\frac{d\theta_4}{d\theta} = \frac{d\theta_3}{d\theta}$$

$$L_4 \frac{d\theta_4}{d\theta} \sin \theta_4 - L_5 \frac{d\theta_5}{d\theta} \sin \theta_5 - L_6 \frac{d\theta_6}{d\theta} \sin \theta_6 = 0$$

$$L_4 \frac{d\theta_4}{d\theta} \cos \theta_4 - L_5 \frac{d\theta_5}{d\theta} \cos \theta_5 - L_6 \frac{d\theta_6}{d\theta} \cos \theta_6 = 0$$

- Aceleración: se obtiene haciendo las derivadas segundas de las variables dependientes respecto de  $\theta$ .

$$L_2 \frac{d^2\theta_2}{d\theta^2} \sin \theta_2 + L_3 \frac{d^2\theta_3}{d\theta^2} \sin \theta_3 = L_1 \cos \theta - L_2 \left( \frac{d\theta_2}{d\theta} \right)^2 \cos \theta_2 - L_3 \left( \frac{d\theta_3}{d\theta} \right)^2 \cos \theta_3$$

$$\frac{d^2\theta_4}{d\theta^2} = \frac{d^2\theta_3}{d\theta^2}$$

$$-L_2 \frac{d^2\theta_2}{d\theta^2} \cos \theta_2 - L_3 \frac{d^2\theta_3}{d\theta^2} \cos \theta_3 = L_1 \sin \theta - L_2 \left( \frac{d\theta_2}{d\theta} \right)^2 \sin \theta_2 - L_3 \left( \frac{d\theta_3}{d\theta} \right)^2 \sin \theta_3$$

$$L_4 \frac{d^2\theta_4}{d\theta^2} \sin \theta_4 - L_5 \frac{d^2\theta_5}{d\theta^2} \sin \theta_5 - L_6 \frac{d^2\theta_6}{d\theta^2} \sin \theta_6 =$$

$$= L_4 \left( \frac{d\theta_4}{d\theta} \right)^2 \cos \theta_4 - L_5 \left( \frac{d\theta_5}{d\theta} \right)^2 \cos \theta_5 - L_6 \left( \frac{d\theta_6}{d\theta} \right)^2 \cos \theta_6$$

$$\begin{aligned}
 L_4 \frac{d^2 \theta_4}{d\theta^2} \cos \theta_4 - L_5 \frac{d^2 \theta_5}{d\theta^2} \cos \theta_5 - L_6 \frac{d^2 \theta_6}{d\theta^2} \cos \theta_6 = \\
 = L_4 \left( \frac{d\theta_4}{d\theta} \right)^2 \sin \theta_4 - L_5 \left( \frac{d\theta_5}{d\theta} \right)^2 \sin \theta_5 - L_6 \left( \frac{d\theta_6}{d\theta} \right)^2 \sin \theta_6
 \end{aligned}$$

Las ecuaciones expuestas anteriormente resuelven la cinemática del mecanismo pantógrafo. En dichas ecuaciones se expresan o pueden expresarse las variables dependientes y sus primeras y segundas derivadas temporales en función de  $\theta$  y  $\dot{\theta}$ .

### 3.4 Análisis dinámico no lineal del mecanismo

En este apartado se realiza un modelo dinámico del pantógrafo con la hipótesis de sólido rígido para poder realizar un estudio dinámico posterior en SolidWorks®. Esta hipótesis consiste en que las barras son rígidas y dos puntos cualesquiera mantienen constante la distancia entre sí [Mora, 2011].

Para la modelización dinámica se aplicará las ecuaciones de Lagrange. En el sistema actúan fuerzas elásticas, gravitatorias y no conservativas. Las ecuaciones a utilizar son:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = Q$$

$$L = T - V$$

donde  $T$  es la energía cinética,  $V$  es la energía potencial y  $Q$  es el vector de fuerzas generalizadas. El sistema de coordenadas es fijo y las restricciones son holónomas.

La energía cinética es:

$$T = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^n m_i v_{Gi}^2 + \sum_{i=1}^n I_i w_i^2 \right]$$

donde  $n$  es el número de barras,  $v_{Gi}^2$  es la velocidad del centro de gravedad de cada barra y  $w_i^2$  es la velocidad angular de cada barra.

La energía potencial es:

$$V = \sum_{i=1}^n g m_i y_{Gi}$$

donde  $y_{Gi}$  es la altura del centro de gravedad de cada barra.

Para el vector de fuerzas generalizadas tenemos la fuerza vertical  $F_0$  aplicada en el punto más alto del pantógrafo (barra 4) para simular el contacto con la catenaria y un par  $M_0$  en la barra 1 que genera la valona. Para ello, se aplicará el principio de trabajos virtuales.

$$\partial W = \sum Q_j \delta q_j = Q^T \delta q = 0$$

donde  $Q$  es el vector de fuerzas generalizadas.

El par que aporta la valona para que el pantógrafo se levante es el siguiente.

$$M_0 = \frac{dV}{d\theta} + F_0(L_1 \cos \theta + L_4 \dot{\theta}_4 \cos \theta_4)$$

### 3.5 Características del software Matlab®

Matlab® (MATrix LABoratory) es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Integra [Matlab, 2016]:

- Cálculo matricial.
- Análisis numérico.
- Procesamiento de señales.
- Gráficos.

Los problemas y las soluciones se expresan matemáticamente, sin la programación tradicional. Es un sistema interactivo cuyo elemento básico de datos es una matriz que no requiere dimensionamiento. En la industria, se utiliza para investigación y para resolver problemas prácticos de ingeniería y matemáticas, con un gran énfasis

en aplicaciones de control y procesamiento de señales. También proporciona una serie de soluciones específicas denominadas *TOOLBOXES* que permiten resolver problemas como:

- Diseño de sistemas de control.
- Procesamiento de señales.
- Simulación de sistemas dinámicos.
- Identificación de sistemas.
- Redes neuronales y otros.

Las prestaciones más importantes son:

- Escritura del programa en lenguaje matemático.
- Implementación de las matrices como elemento básico del lenguaje permitiendo una reducción del código porque no necesita implementar el cálculo matricial.
- Implementación de aritmética compleja.
- Un gran contenido de órdenes específicas agrupadas en *TOOLBOXES*.
- Posibilidad de ampliar y adaptar el lenguaje, mediante ficheros de script y funciones .m.

### **3.6 Estudio del pantógrafo con el programa Matlab®**

Se ha utilizado el programa Matlab® para resolver las ecuaciones de la dinámica del mecanismo pantógrafo. Para llevar a cabo el programa, se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

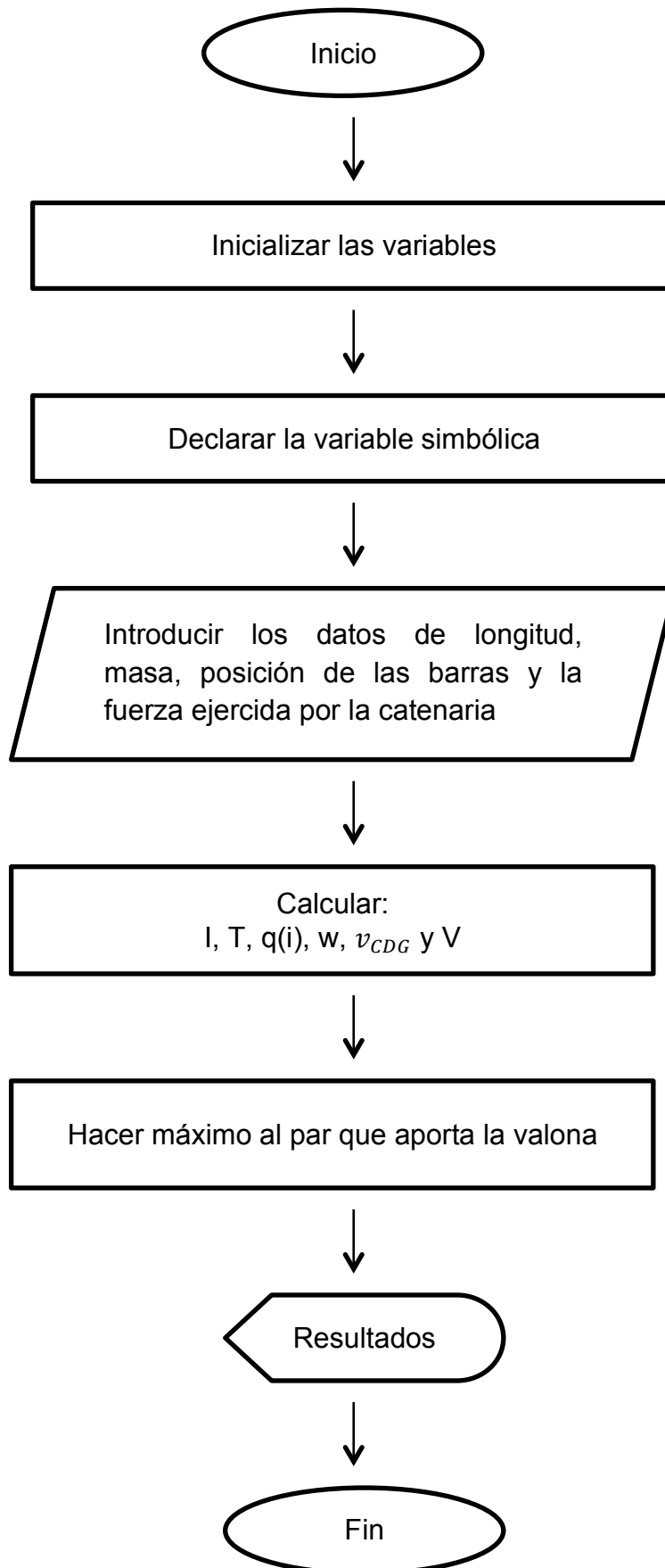
- Las barras del pantógrafo son de dos tipos: cilíndricas y de sección no constante.
- Para calcular la masa de las barras que no son de sección constante, se ha cogido la sección transversal de los extremos y se ha hecho la media con dichos valores para obtener el área.

- Los CDG (centro de gravedad) de las barras se han calculado como la altura desde el plano horizontal hasta la  $\frac{\text{longitud de cada barra}}{2}$ .
- Se ha supuesto un espesor de 10 cm.
- La densidad de las barras es de  $7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  (acero).

### 3.6.1 Algoritmo

1. Inicio.
2. Inicializar variables.
3. Declarar la variable simbólica.
4. Introducir los datos de longitud, masa, posición de las barras y la fuerza ejercida por la catenaria.
5. Cálculo de los momentos de inercia (I).
6. Cálculo de la energía cinética (T).
7. Cálculo de los ángulos en función de la variable independiente (q(i)).
8. Cálculo de la velocidad angular de cada barra (w).
9. Cálculo de la velocidad del centro de gravedad de cada barra ( $v_{CDG}$ ).
10. Cálculo de la energía potencial (V).
11. Hacer máximo al par que aporta la valona para hallar el ángulo mínimo de la manivela motriz.
12. Resultados.
13. Fin.

### 3.6.2 Diagrama de flujo



### 3.6.3 Resultados

Una vez ejecutado el programa, el valor del ángulo mínimo que se obtuvo era un número complejo. Como la parte imaginaria era próxima a  $1 \times 10^{-3}$  se consideró despreciable y solo se tuvo en cuenta la parte real para el resultado.

$$\theta = 1.91200970963555 - 0.0052178195605 i \text{ rad}$$

Para obtener el resultado definitivo se hizo la conversión de radianes a grados.

$$\theta = 109.87^\circ$$

Con este resultado, se podrá realizar el estudio cinemático del pantógrafo en SolidWorks® presentado en el siguiente capítulo.

# CAPÍTULO 4

## Modelado tridimensional del pantógrafo DSA 250.09

### 4.1 Características del software de simulación SolidWorks®

SolidWorks® es un software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado mecánico en 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks® Corp., una filial de Dassault Systèmes, S.A. (Suresnes, Francia), para el sistema operativo Microsoft Windows. Su primera versión fue lanzada al mercado en 1995 con el propósito de hacer la tecnología CAD más accesible.

El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en trasvasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada.

Junto con las herramientas de diseño de Pieza, Ensamblajes y Dibujo, SolidWorks® incluye Herramientas de Productividad, de Gestión de Proyectos, de Presentación y de Análisis y Simulación que lo hacen uno de los estándares de diseño mecánico más competitivo del mercado.

Una de sus características es poder realizar el estudio del movimiento de la pieza diseñada y un análisis cinemático detallado. También, se pueden realizar diversas geometrías en formato tridimensional.

El diseño paramétrico consiste en configurar numerosos tipos de relaciones como paralelismo, conicidad e igualdad entre otros muchos [SolidWorks, 2015].



Las funciones destacadas del CAD en 3D son las siguientes [Dassault Systèmes SolidWorks Corp., 2015]:

- modelado de sólidos en 3D.
- diseño de ensamblajes grandes.
- diseño de chapa metálica.
- piezas soldadas.
- diseño de piezas de plástico y de fundición.
- diseño de moldes.
- diseño de conductos y mazos de cables eléctricos.
- diseño de tuberías y tubos.
- importación y exportación con CAD.

Las funciones destacadas de SolidWorks® Simulation son las siguientes [Dassault Systèmes SolidWorks Corp., 2015]:

- análisis de tensión lineal.
- análisis no lineal.
- análisis de piezas de plástico y caucho.
- análisis por elementos finitos (FEA).
- análisis estructural térmico.
- dinámica de fluidos computacional (CFD).

A través de este software se creará un modelo del pantógrafo DSA 250.09 en el que se estudiará su movimiento. Para ello, se realizarán todas las piezas por separado para luego poder crear un ensamblaje. Una vez que se tenga todo el conjunto definido con las relaciones entre dichas piezas (conicidad, paralelismo, perpendicularidad, etc.) a través del estudio de simulación se podrá dar movimiento a las piezas correspondientes y ver el resultado final con sus respectivos gráficos con el SolidWorks® Motion.

## **4.2 Modelado SolidWorks®**

En esta parte del capítulo se afrontará el diseño y estudio del movimiento del

pantógrafo DSA 250.09 mediante software. El modelado realizado en SolidWorks® está diseñado con unas medidas aproximadas a las reales del pantógrafo DSA 250.09, que se encuentran a continuación [Stemmann Technik, 2014]:

En la figura 4.1 se aprecia una primera imagen del pantógrafo 250.09 obtenido en SolidWorks®.

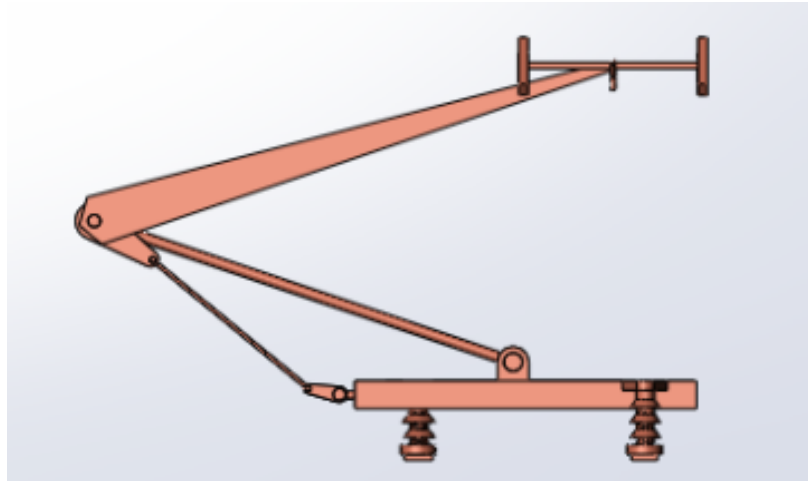


Fig. 4.1 – Modelo del pantógrafo DSA 250.09 diseñado en SolidWorks®

El modelo está realizado para el estudio del movimiento cinemático del pantógrafo, por tanto, algunos detalles técnicos de la parte mecánica han sido eliminados debido a que no resultan útiles para dicho estudio. Se puede destacar de este modelo la simetría de comportamiento con respecto a la dirección de desplazamiento, el paralelismo al plano de las tiras de contacto de cobre es garantizado siempre independientemente de la altura del punto de contacto y se compone de una estructura mecánica simple y robusta.

### 4.3 Modalidades de funcionamiento simulado

En este apartado se efectuará una simulación de tipo cinemático del pantógrafo DSA 250.09. El pantógrafo puede asumir principalmente las configuraciones de posición de reposo, cuando está totalmente agachado y sin contacto con la catenaria (figura 4.2), y la posición de trabajo, cuando está en contacto progresivo con la catenaria (figura 4.3).

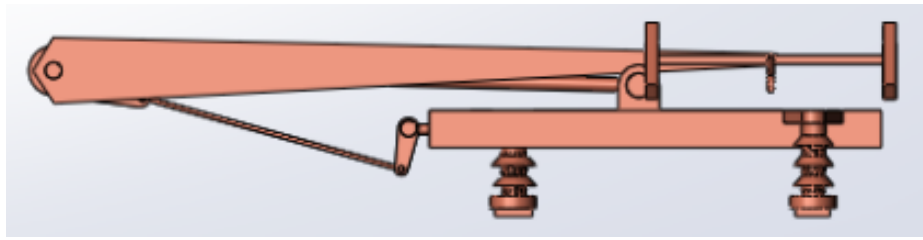


Fig. 4.2 – Modelo del pantógrafo DSA 250.09 diseñado en SolidWorks®

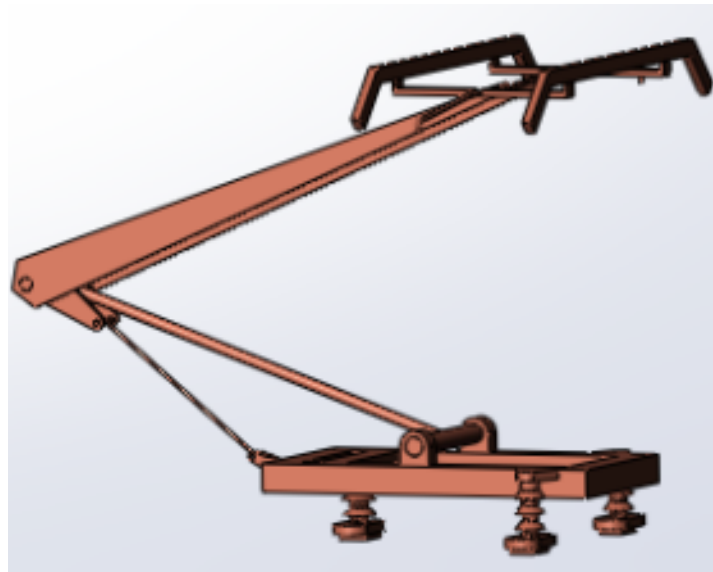


Fig. 4.3 – Modelo del pantógrafo DSA 250.09 diseñado en SolidWorks®

Para que haya un contacto continuo, tiene que haber una fuerza (excitación al sistema). La magnitud de esta fuerza no es siempre la misma, depende de la velocidad del tren. A baja velocidad, el módulo de la fuerza necesaria para mantener el equilibrio de contacto es menor respecto a alta velocidad.

Para el pantógrafo DSA 250.09 el empuje estático que garantiza un contacto constante entre el pantógrafo y la catenaria es de 100 N para una velocidad de 220 km/h.

#### 4.4 Resultados de simulación

El movimiento que se estudiará es la abertura del pantógrafo hasta establecer el

contacto con la catenaria. Para ello, se realizarán dos estudios. En el primer estudio se realizarán las gráficas de posición, velocidad y aceleración lineal en el punto M. El punto M es donde suponemos que se produce el contacto con la catenaria y, por tanto, donde se aplicará la fuerza. En el segundo estudio, se realizarán las gráficas de velocidad y aceleración angulares en el motor aplicado (par aportado por la valona). Los pasos a seguir son:

- Elegir el espacio de tiempo en el que se va a realizar el movimiento.
- Colocar el motor rotatorio asignándole una velocidad angular  $[\frac{rev}{min}]$ .
- Realizar la simulación en Solidworks®.
- Obtener gráficas.

#### 4.4.1 Estudio del contacto pantógrafo – catenaria en el punto M

En este estudio se abarca el movimiento del pantógrafo producido desde la posición de reposo hasta el contacto con la catenaria mediante las gráficas de posición, velocidad y aceleración lineal en el punto M. Para suponer este contacto, se ha aplicado en el punto M una fuerza de 100 N (figura 4.4).

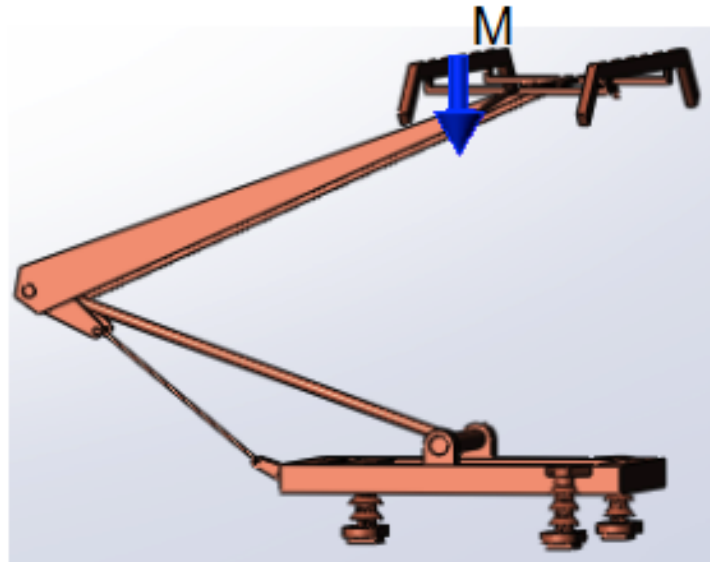
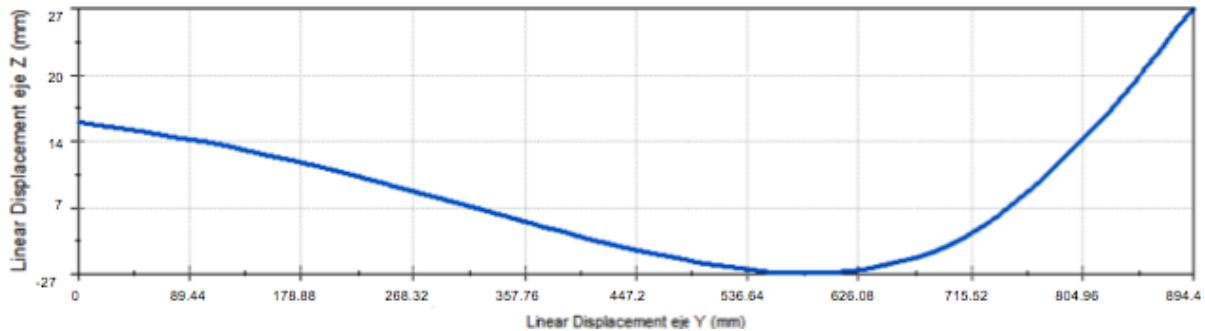


Fig. 4.4 – Punto donde se aplica la fuerza M

a. Desplazamiento:

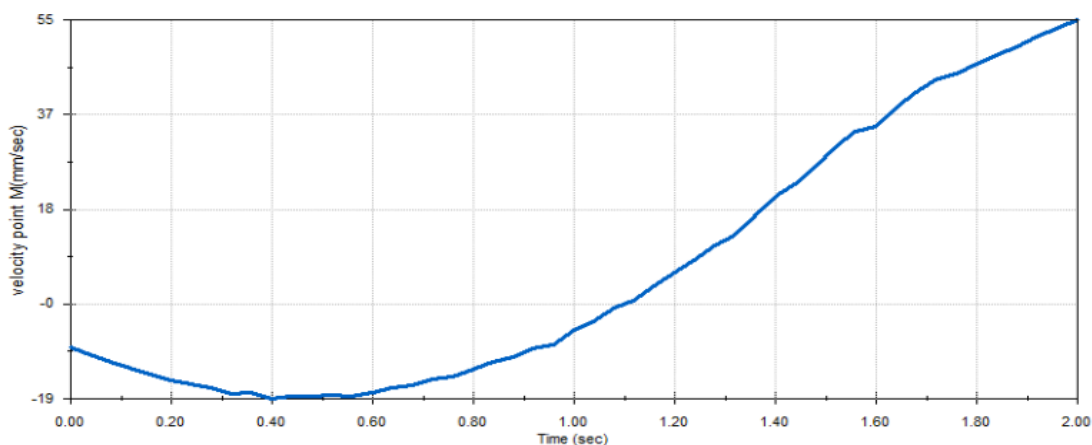
En la gráfica 4.1 se observa el desplazamiento curvilíneo realizado por el pantógrafo. Primero desciende 27 mm para coger impulso y poder ascender todo el mecanismo hasta el punto máximo.



Gráfica 4.1 – Desplazamiento lineal del punto M

b. Velocidad:

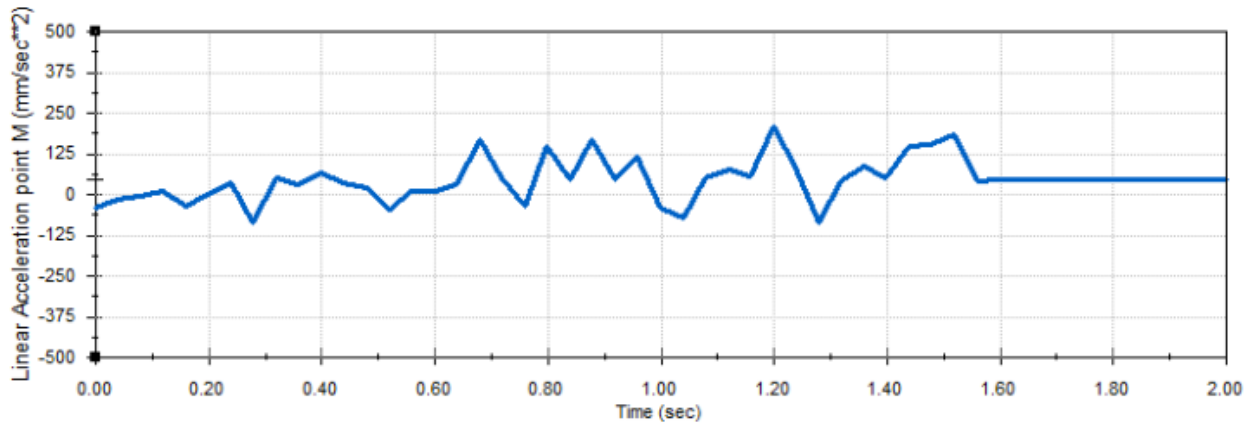
En la curva de velocidad (gráfica 4.2) hay un movimiento ascendente hasta que se alcanza el punto máximo ya que la trayectoria seguida depende del par que tiene velocidad constante en la entrada. En el gráfico se puede observar que, hasta que alcanza el punto máximo el movimiento, es más rápido para evitar un contacto violento con la catenaria.



Gráfica 4.2 – Gráfica de velocidad del punto M

c. Aceleración:

En la curva de aceleración (gráfica 4.3) se observa un movimiento progresivo con una trayectoria discontinua debido a los muelles que son necesarios para un correcto funcionamiento del pantógrafo y que son causa de vibraciones.



Gráfica 4.3 – Gráfica de la aceleración del punto M

#### 4.4.2 Estudio del par aportado por la valona

En este estudio se realizarán las gráficas de velocidad y aceleración angulares en el motor aplicado simulando el par aportado por la valona (figura 4.5). Para ello, se ha utilizado el dato obtenido mediante la programación en Matlab®.

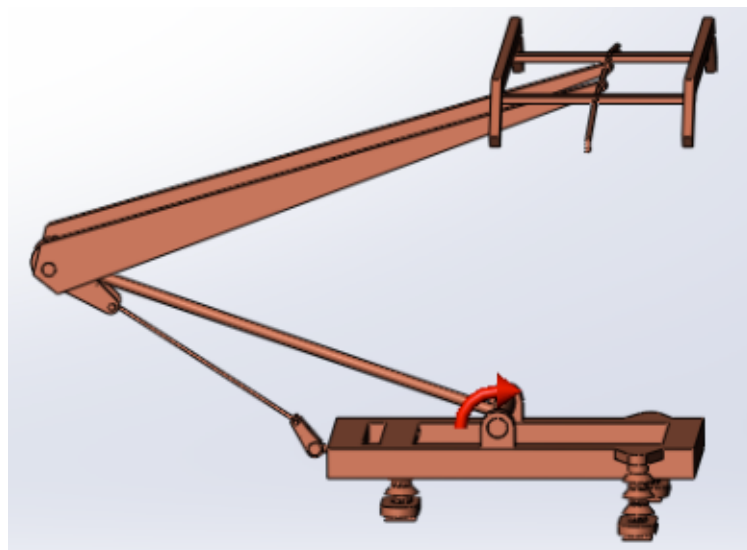
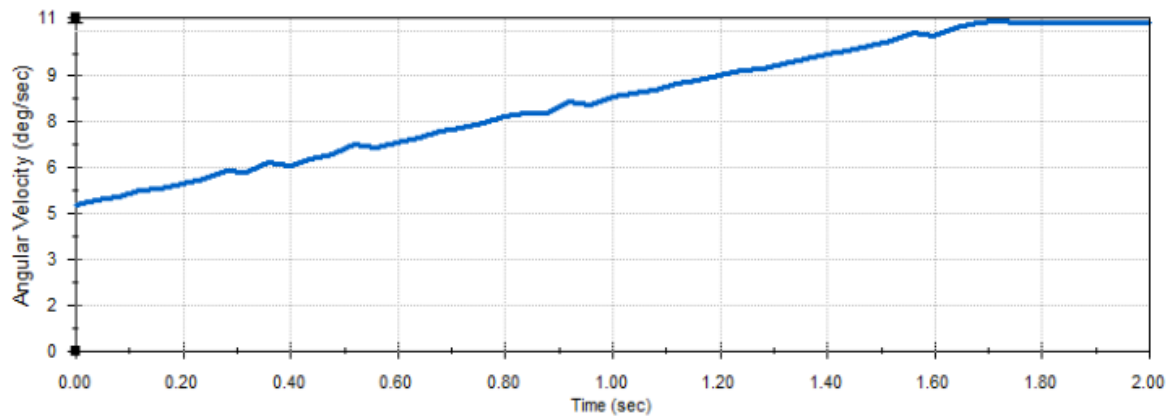


Fig. 4.5 – Par valona

a. Velocidad:

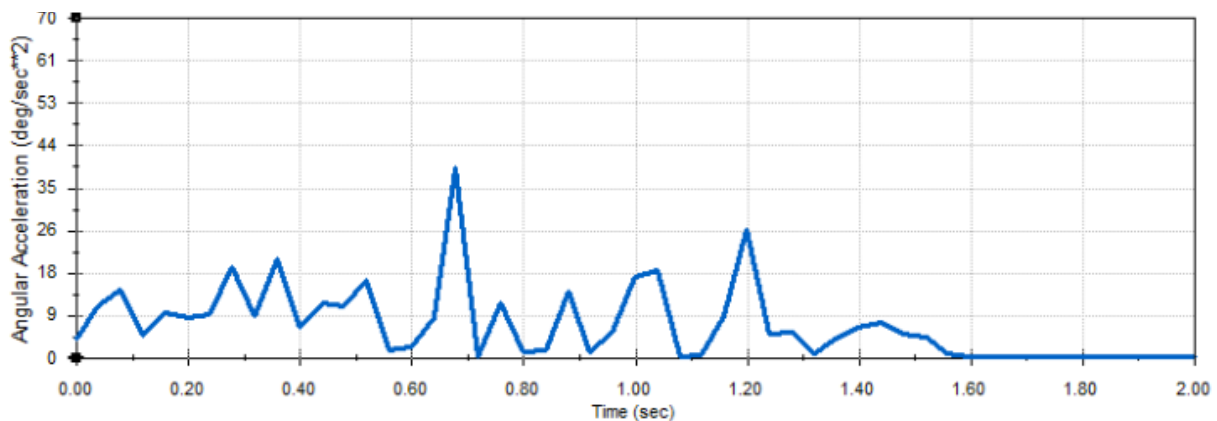
En la gráfica 4.4 se observa un incremento de la velocidad hasta que el pantógrafo alcanza su altura máxima (en  $t=1,70$  sec aproximadamente) y la velocidad se mantiene constante a partir de ese valor.



Gráfica 4.4 – Velocidad angular

b. Aceleración:

En la gráfica 4.5 el movimiento de la aceleración muestra una irregularidad pequeña que puede considerarse constante alrededor de un valor.



Gráfica 4.5 – Aceleración angular

## 4.5 Alternativas de diseño

A partir de los resultados obtenidos, los estudios que serían interesantes de analizar son:

1. Hacer un modelo dinámico linealizado del descrito en el capítulo 2 con la hipótesis de pequeños desplazamientos utilizando la serie de Taylor. Este método sería más fácil de trabajar con el programa Matlab®.
2. Hacer un modelo de barras deformables para ver su influencia en la dinámica del mecanismo. Este estudio se podría realizar con el programa Abaqus.
3. Analizar un pantógrafo con un material diferente en los frotadores para poder compararlos, ver las ventajas e inconvenientes de cada uno, y ver cuál ofrece una mayor eficiencia.



## CAPÍTULO 5

### Entorno socioeconómico

La serie DSA fabricada por la compañía Stemmann – Technik ha sido desarrollada para maximizar la actuación en transporte de larga distancia y vehículos pesados. Su diseño con materiales ligeros de alta resistencia y su innovador sistema tecnológico han sido probados en muchos países en el mundo bajo extremas condiciones obteniendo unos resultados satisfactorios. La serie DSA puede ser diseñada para redes de corriente continua o alterna, alcanzando velocidades de hasta 380 km/h por el vehículo ferroviario en el que están instalados [Stemmann Technik, 2016].

Sin embargo, en países como Japón y China nos superan en innovación. Desde 2009, en Shanghai, (China) está en servicio el tren de levitación magnética Maglev. El tren Maglev funciona a través de pulso magnético, colocando el tren a 10 centímetros de las vías, y con imanes superconductores a una temperatura de menos 273°C anulando la resistencia eléctrica e incrementando la velocidad. El gran inconveniente que tiene es el elevado coste económico [Hipertextual, 2015].

El Shanghai-Maglev (figura 5.1) es la primera línea comercial de alta velocidad mediante levitación magnética construida en el mundo. Une el aeropuerto internacional de Pudong y la estación de metro de Longyang Road. La distancia entre ambos puntos es de 30 kilómetros. Alcanza una velocidad máxima de 431 km/h [No solo ingeniería, 2016].



Fig. 5.1 – Maglev Shanghai [No solo ingeniería, 2016]

En Yamanashi, Japón, este tipo de tren está en periodo de prueba. Se tiene previsto su funcionamiento para 2027 (figura 5.2). Alcanza una velocidad máxima de 600 km/h. Es el tren más silencioso y rápido hasta el momento [El País, 2015].



Fig. 5.2 – Maglev Yamanashi [El País, 2015]

En España, se estudió la rentabilidad de este proyecto para unir las estaciones de el aeropuerto de Madrid-Barajas con la zona de Campamento y el corredor del Henares, desde Alcalá hasta Chamartín. Finalmente, se desechó esta propuesta por su coste económico.

# CAPÍTULO 6

## Presupuesto

A continuación, se detallará los costes de fabricación de este trabajo. Dichos costes se agrupan en dos categorías:

- Coste del personal involucrado en el trabajo.
- Costes de elementos software y hardware.

### 6.1 Presupuesto inicial

Se estima una duración del proyecto de 6 meses. Este apartado indica el presupuesto que se planteó antes de comenzar el proyecto.

#### 6.1.1 Coste del personal

Se tendrá en cuenta el número de personas y el cargo que ocupa cada uno en el proyecto. Para asignar el precio de la hora en cada cargo, se tendrá en cuenta la experiencia de cada uno en el sector y el precio que hay en el mercado actualmente.

Los supervisores de este proyecto han sido Marco Ceccarelli y Giuseppe Carbone en Cassino (Italia), y Cristina Castejón en Madrid. Como Ingeniera Junior está la autora de este trabajo, Alba López.

En la tabla 6.1 se muestra el cargo, el precio de la hora, el total de horas trabajadas y el coste total por cargo. Además, se indica el coste total del personal.

Tabla 6.1 - Coste del personal en el presupuesto inicial

<b>Cargo</b>	<b>€ <i>hora</i></b>	<b>Total de horas [h]</b>	<b>Coste total [€]</b>
<b>Supervisores</b>	45	42	1890
<b>Ingeniera junior</b>	20	300	6000

<b>Coste total</b>	<b>7890 €</b>
--------------------	---------------

### 6.1.2 Coste de elementos software y hardware

Los materiales utilizados en este proyecto son un programa matemático y un programa de simulación. Las licencias de Matlab® y SolidWorks® serán cedidas por la universidad, lo que supondrán un coste nulo. El portátil MacBook Pro será utilizado para desarrollar todo el proyecto. Cuenta con las siguientes características:

- Pantalla: 13 pulgadas
- Procesador: 2,4 GHz Intel Core i5
- Memoria RAM: 4 GB de memoria DDR3 a 1067 MHz
- Disco duro: 500GB
- Tarjeta gráfica: Intel HD Graphics
- Software: OS X

En la tabla 6.2 se indica el producto utilizado, el precio que ha costado, el periodo de amortización, el tiempo de uso de cada producto y el coste para el proyecto.

Tabla 6.2 - Coste de SW y HW en el presupuesto inicial

Producto	Precio [€]	Periodo de amortización [meses]	Tiempo de uso del producto [meses]	Coste para el proyecto [€]
<b>MacBook Pro</b>	1199	48	6	149.875
<b>Licencia Solidworks®</b>	Versión académica	-	6	0
<b>Licencia Matlab®</b>	Versión académica	-	6	0

<b>Coste total</b>	<b>149.875 €</b>
--------------------	------------------

### 6.1.3 Coste total del proyecto

Será la suma del coste del personal más el coste de los elementos software y hardware que se han planificado para el proyecto.

Tabla 6.3 – Coste total del proyecto

Concepto	Coste total [€]
<b>Personal</b>	7890
<b>Software y hardware</b>	149.875
<b>Coste total del proyecto</b>	<b>8039.875</b>

## 6.2 Presupuesto final

Se va a realizar el presupuesto final del proyecto con las horas exactas empleadas por cada persona contratada y los materiales que finalmente se han empleado. En total, la duración del proyecto es de 5 meses.

### 6.2.1 Coste del personal

Como se ha mencionado en el presupuesto inicial, para asignar el precio de la hora de cada participante se valora su trayectoria en el sector, la categoría del puesto y el valor de la hora actual en el mercado.

Los supervisores de este proyecto siguen siendo Marco Ceccarelli y Giuseppe Carbone en Cassino (Italia), y Cristina Castejón en Madrid. Como Ingeniera Junior está la autora de este trabajo, Alba López.

En la tabla 6.4 se muestra el cargo, el precio de la hora, el total de horas trabajadas y el coste total por cargo. Además, se indica el coste total del personal.

Tabla 6.4 - Coste del personal en el presupuesto final

<b>Cargo</b>	<b>€ <i>hora</i></b>	<b>Total de horas [h]</b>	<b>Coste total [€]</b>
<b>Supervisores</b>	47	38	1786
<b>Ingeniera Junior</b>	20	400	8000

<b>Coste total</b>	<b>9786 €</b>
--------------------	---------------

## 6.2.2 Coste de elementos software y hardware

Además de la compra del ordenador y las licencias de los programas cedidos por la universidad, se tendrá que hacer una partición del Mac para poder instalarlos.

En la tabla 6.5 se indica el producto utilizado, el precio que ha costado, el periodo de amortización, el tiempo de uso de cada producto y el coste para el proyecto.

Tabla 6.5 - Coste de SW y HW en el presupuesto final

Producto	Precio [€]	Periodo de amortización [meses]	Tiempo de uso del producto [meses]	Coste para el proyecto [€]
MacBook Pro	1199	48	5	124.89
Partición de Windows en Mac	74.85	12	5	31.187
Licencia Solidworks®	Versión académica	-	5	0
Licencia Matlab®	Versión académica	-	5	0
<b>Coste total</b>				<b>156.077 €</b>

### 6.2.3 Coste total del proyecto

Sumando los costes del personal y de los componentes software y hardware, el coste total del proyecto para una empresa si se hubiera llevado a cabo es de 9942.077€.

Tabla 6.6 – Coste total del proyecto

<b>Concepto</b>	<b>Coste total [€]</b>
<b>Personal</b>	9786
<b>Software y hardware</b>	156.077
<b>Coste total del proyecto</b>	<b>9942.077</b>



# CAPÍTULO 7

## Conclusiones

Después de recapitular toda la información redactada en el capítulo 1 de los diferentes tipos de pantógrafos que ha habido en funcionamiento, en España destaca el uso del pantógrafo asimétrico. Es por eso, que entre todos los mecanismos existentes se elige el DSA 250.09 como mecanismo de estudio.

Mediante las ecuaciones de cierre y sus derivadas temporales, la parte cinemática queda definida. La parte dinámica está realizada a través de las ecuaciones de Lagrange. Con la utilización del software Matlab® se pueden conseguir resultados fiables para simular en SolidWorks® el movimiento que realiza el pantógrafo.

Esto confirma que el uso de software como los mencionados anteriormente, constituyen hoy en día una válida alternativa a estudios reales que requieren de pruebas físicas con el pantógrafo, ya que se pueden realizar ensayos en condiciones extremas sin necesidad de deteriorar ningún componente. Estos programas no pueden sustituir por completo a una prueba física, pero si pueden representar una buena base para un estudio más en profundidad.

Esto supone para toda empresa una reducción de costes, porque en vez de realizar con cada posible solución un ensayo real y provocar pérdidas tanto en componentes como en tiempo, solo sería necesario realizar el ensayo con la solución final obtenida con un software mostrando la empresa una mayor eficiencia hacia el cliente.

### 7.1 Trabajos futuros

Para hacer un estudio más completo de este trabajo se podría abordar los siguientes temas:

1. Introducir la mesilla para que el mecanismo tenga más GDL (grados de libertad).

Por ejemplo, habría 4 GDL si contamos el giro y los desplazamientos vertical y horizontal de la mesilla además del ángulo que se ha calculado en este trabajo. También se puede tener 3 GDL si anulamos el giro y sus derivadas temporales ( $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta} = 0$ ).

2. La interacción pantógrafo-catenaria mediante el método de elementos finitos en coordenadas nodales absolutas para modelar la catenaria. Se tendrá que realizar un algoritmo de integración temporal para poder usar el modelo no lineal de barras rígidas.
3. Incluir rozamiento en la mesilla para ver el efecto que provoca en la fuerza de contacto entre pantógrafo-catenaria.
4. Además de la no linealidad en la geometría de las barras, también se podría incluir la no linealidad de los resortes que unen la mesilla con el cuerpo del pantógrafo y el de los amortiguadores.

## CAPÍTULO 8

### Bibliografía

[Adif, 2015]

Adif, imágenes; [http://www.adif.es/es\\_ES/comunicación\\_y\\_prensa/fichas\\_de\\_actualidad/ficha\\_actualidad\\_00070.shtml](http://www.adif.es/es_ES/comunicación_y_prensa/fichas_de_actualidad/ficha_actualidad_00070.shtml) (última visita: 1 de junio 2015)

[Arriola y Ciordia 1981]

Arriola I., Ciordia R., “ Pantógrafos de alta velocidad y de alta intensidad de captación ”, General Eléctrica Española, País Vasco, 1981

[Bianchi y Taxi, 1992]

Bianchi C., Taxi G., “ Pantógrafos para ferrocarriles de corriente continua ”, Ente Ferrovie dello Stato (FS), Firenze, 1992

[Borreguero, 2010]

Borreguero Baños H., “Análisis mediante elementos finitos / matlab de la interacción dinámica pantógrafo - catenaria”, Madrid; España, 2010

[Centro Politécnico Superior, 2015]

Centro Politécnico Superior, imagen de pantógrafo; <http://www.cps.unizar.es/transp/Ferrocarriles/LOCOMOTORAS> (última visita: 1 de junio 2015)

[Cyee, 2015]

Cyee, catálogo; <http://www.cyee.es/catalogos/catalogo%20CyeeSpain.pdf> (última visita: 1 de junio 2015)

[Dassault Systèmes SolidWorks Corp., 2015]

Dassault Systèmes SolidWorks Corp., productos, <http://solidworks.es/sw/products/3d-cad/solidworks-premium.htm> (última visita: 1 de junio 2015)

[Donzello, 2015]

Giorgio Donzello, La Storia dei Pantografi FS, [http://www.rotaie.it/New%20Pages/I\\_Pantografi\\_FS.html](http://www.rotaie.it/New%20Pages/I_Pantografi_FS.html) (última visita: 1 de junio 2015)

[El País, 2015]

El País, ciencia, [http://elpais.com/elpais/2015/04/27/ciencia/1430131846\\_584960.html](http://elpais.com/elpais/2015/04/27/ciencia/1430131846_584960.html) (última visita: 15 de junio 2016)

[European Railway Server, 2010]

European Railway Server, galería de imágenes; <http://www.railfaneurope.net> (última visita: 1 de junio 2015)

[Faiveley transport, 2011]

Faiveley transport, noticias, imágenes; <http://www.faiveleytransport.com/> (última visita: 1 de junio 2015)

[Foro trenes, 2012]

Foro trenes, imagen; <http://www.forotrenes.com/foro/viewtopic.php?f=9&t=24751&start=300> (última visita: 1 de junio 2015)

[Hipertextual, 2015]

Hipertextual, búsqueda, maglev, <http://hipertextual.com/2015/04/maglev-asi-funciona-tren-vuela-600-kilometros-hora> (última visita: 15 de junio 2016)

[Internacional Railway Journal, 1992]

“High Speed pantographs enter new territory”, Internacional Railway Journal, 1992

[Jiménez, 2012]

Jiménez I. A., “ Sistema de inspección de pantógrafos de trenes mediante visión artificial ”, Fundación de los ferrocarriles españoles, Madrid, 2012

[López y Ceccarelli, 2013]

López Cajún C.S., Ceccarelli M., “ Mecanismos ”, Trillas, Ciudad de México, 2013

[Mallard,1991]

Mallard J.J., “ La toma de corriente con pantógrafos de alta velocidad ”, Faiveley Transport, París, 1991

[Mora, 2011]

Mora Martínez H., “ Modelado de la interacción dinámica pantógrafo-catenaria ”, Valencia; España, 2011

[Matlab, 2016]

Matlab, descripción de Matlab, <http://nereida.deioc.ull.es/~pcgull/ihiu01/cdrom/matlab/contenido/node2.html> (última visita: 15 de junio 2016)

[No solo ingeniería, 2016]

No solo ingeniería, <http://nosoloingenieria.com/shanghai-maglev/> (última visita: 15 de junio 2016)

[RENFE, 1989]

RENFE, “ Norma técnica sobre ensayos de captación de corriente en línea para pantógrafos de nuevo tipo ”, Dirección técnica, 1989

[RENFE, 2004]

RENFE, “ Norma técnica de mantenimiento, Pantógrafo AM 32 AV ”, Dirección general de Grandes líneas, Dirección de Material, 2004

[RENFE, 2014]

RENFE, Reference list DSA pantograph, 2014

[Rodríguez, 2010]

Rodríguez J: A., “ Ingeniería Ferroviaria, Tomo II ”, Ed: Juan de la Cuesta, 2010

[SolidWorks, 2015]

SolidWorks, historia de la empresa, [www.solidworks.es/sw/656\\_ESN\\_HTML.htm](http://www.solidworks.es/sw/656_ESN_HTML.htm) (última visita: 1 de junio 2015)

[Stemmann Technik, 2014]

Stemmann Technik, plano de pantógrafo, <http://www.stemmann.de> (última visita: 1 de junio 2015)

[Stemmann Technik, 2016]

Stemmann Technik, The Stemmann-Technik Roof-Mounted Pantographs, [http://www.stemmann.de/documents/catalogues/ST-Company-Profile\\_en.pdf](http://www.stemmann.de/documents/catalogues/ST-Company-Profile_en.pdf) (última visita: 1 de junio 2015)

[Vittrains models, 2014]

Vittrains models, pantógrafo 6053 FS 52, <http://www.vittrains.it/it/prodotti/pantografi> (última visita: 1 de junio 2015)